

# Neue Verdichterlösungen für das Kältemittel CO<sub>2</sub>

Harald Kaiser, Frickenhausen

*Zur Ausgangslage: Europäischer Verordnungsentwurf über bestimmte fluorierte Treibhausgase und Richtlinienvorschlag über Emissionen von Klimaanlageanlagen in Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates wurden am 14. Juni 2006 angenommen. Mit der so genannten F-Gase-Verordnung sollen Emissionen von Fluorkohlenwasserstoffen (FKW) aus Kälte- und Klimaanlageanlagen begrenzt und minimiert werden. Insgesamt leistet das verabschiedete Rechtsetzungspaket einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der im Kyoto-Protokoll festgelegten Klimaschutzziele durch die EU und ihre Mitgliedstaaten.*

Noch vor Inkrafttreten der F-Gase-Verordnung im Juli 2006 wurde für bestimmte Anwendungsbereiche das natürliche Kältemittel CO<sub>2</sub> als eine der möglichen Alternativen zu den F-Gasen diskutiert. Kohlendioxid ist das einzige unbrennbare und toxisch nahezu umweltneutrale natürliche Kältemittel, das sich auch für Kaldampfprozesse im üblichen Temperaturbereich heutiger Kälte- und Wärmepumpenanwendungen eignet.

Aufgrund der kalorischen Stoffeigenschaften von Kohlendioxid treten bei der Verwendung als Kältemittel in Kompressionskälteprozessen wesentlich höhere Drücke auf, als es bei kältetechnischen Anwendungen bisher üblich war. Vorteile durch die hohe volumetrische Kälteleistung von CO<sub>2</sub>: das Bauvolumen des Verdichters kann sehr kompakt ausgeführt werden. Für den Einsatz von CO<sub>2</sub> spricht ebenso der geringere Preis bei guter Verfügbarkeit.

Die aussichtsreichsten Einsatzbereiche von CO<sub>2</sub> als Kältemittel sind bestimmte Wärmepumpenanwendungen sowie die Fahrzeugklimatisierung. Hierbei sind sowohl der Pkw- und Busbereich als auch die Bahnklimaanlagen gemeint.

Während CO<sub>2</sub> in der Niederdruckstufe von Kaskadenanlagen bei Drücken bis ca. 40 bar auch in stationären Anlagen schon vermehrt eingesetzt wird, ist in letzter Zeit speziell bei Supermarktanlagen in Skandinavien, auch die Hochdruckstufe mit CO<sub>2</sub> ausgestattet worden.

## Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Verdichter

Die Entwicklung transkritischer CO<sub>2</sub>-Verdichter wurde bei Bock Anfang der 90er Jahre begonnen. So entstand 1993 der erste offene Verdichter für die Busklimatisierung, der 1994 in einer Klimaanlage der Firma

### zum Autor

**Dr.-Ing. Harald Kaiser,**  
Technischer Leiter,  
Bock Kältemaschinen  
GmbH,  
Frickenhausen



Konvekta AG auf der IAA Nutzfahrzeug Messe der Öffentlichkeit vorgestellt wurde.

Zusammen mit führenden Instituten und Zulieferern, speziell im Ventilplattenbereich, entstand ein in mehreren Stufen optimierter 2-Zylinder-Verdichter. Dieser Verdichter wurde dann nicht nur in Busklimaanlagen getestet, sondern war in vielen nationalen und internationalen Forschungsvorhaben Grundlage für entsprechende Versuche.

Mittlerweile wurde eine ganze Baureihe sub- und transkritischer Hubkolbenverdichter entwickelt.

## Verdichter für subkritische CO<sub>2</sub>-Anwendungen

Für den subkritischen Bereich entstand auf Basis des aktuellen Halbhermetikprogrammes nun eine erweiterte, fein abgestufte Verdichterbaureihe. Für die Anwendung mit CO<sub>2</sub> bis 40 bar in beispielsweise unterkritischen Kaskadensystemen steht damit eine komplette Baureihe halbhermetischer Hubkolbenverdichter zur Verfügung.

Die Abstimmung der Verdichter auf CO<sub>2</sub> beschränkt sich im Wesentlichen auf die Motorauslegung in Verbindung mit vereinzelt Triebwerksanpassungen sowie entsprechenden Modifikationen im Ventil- und Dichtungsbereich. Selbstverständlich gilt auch für CO<sub>2</sub>-Verdichter höchste Qualität, Laufruhe und Energieeffizienz. Dabei wird eine zuverlässige und sichere Ölversorgung durch klassischen Schmierölkreislauf mit drehrichtungsunabhängiger Ölpumpe und großvolumigem Ölsumpf zugrunde gelegt.



Erster offener Verdichter Typ FK-CO<sub>2</sub> für die Busklimatisierung im Jahr 1993



Erster subkritischer Hubkolbenverdichter Typ HA-CO<sub>2</sub> im Jahr 2002



HGX-Baureihe von Bock für unterkritische CO<sub>2</sub>-Anwendungen bis 40 bar



Subkritische CO<sub>2</sub>-Verdichter, Fabrikat Bock, bis 130 bar

Das Triebwerk und die Ventilplatte sind an die höheren Anforderungen entsprechend angepasst worden. Ebenso wurde der Gehäusewerkstoff, in Anlehnung an die höhere erforderliche Berstdrucksicherheit, entsprechend hochwertiger gewählt.

Generell wird das Anwendungsgrenzen-Diagramm bei CO<sub>2</sub> durch zwei Einschränkungen begrenzt: die erforderliche Größe der Antriebsmotoren und die Verdichtungsendtemperatur.

Der Einbau von größeren Antriebsmotoren, welche aufgrund der höheren spezifischen Kälteleistung von CO<sub>2</sub> benötigt werden, ist wegen des vorhandenen Bau-raumes beschränkt. Zu tiefe Verdampfungstemperaturen begrenzen den Einsatz bei zu hohen Verdichtungsendtemperat-uren infolge des Isentropenexponenten von CO<sub>2</sub>. Hier wird bei CO<sub>2</sub> schon generell mit 160°C als maximal zulässiger Verdich-tungsendtemperatur gearbeitet.

### Verdichter für transkritische CO<sub>2</sub>-Anwendungen

Der Entwicklung und Konstruktion von aktuellen transkritischen halbhermetischen und offenen CO<sub>2</sub>-Verdichtern ging eine Studie zur optimalen Bauform voraus. Dabei wurden zahlreiche Zylinderanord-nungen für ein optimales Bauvolumen bei guter Eignung für den CO<sub>2</sub>-Hochdruck-bereich untersucht.

Ab einer gewissen Leistungsgröße – bei-spielsweise ab einem Hubvolumen von 10m<sup>3</sup>/h – ist die klassische Anordnung als Reihen- oder V-Anordnung vorteilhafter. Hier kommt jedoch der spezifische Vorteil von CO<sub>2</sub> hinsichtlich hoher volumetrischer



CO<sub>2</sub>-Realisierbarkeitsstudien

Kälteleistung noch nicht zum Tragen. Das Verdichterhubvolumen könnte zwar ent-sprechend kleiner ausgeführt werden (4- bis 5-mal kleiner im Vergleich zu Ver-dichter für F-Kältemittel), aufgrund des erforderlichen hohen Berstdrucks muss aber das Verdichtergehäuse entsprechend voluminöser ausgelegt werden.

Für die gleiche Kälteleistung bei CO<sub>2</sub> ist zwar das Hubvolumen wesentlich kleiner, die erforderliche Antriebsleistung bei glei-cher Kälteleistungszahl ist jedoch gleich groß. So werden auch bei halbhermetischen CO<sub>2</sub>-Verdichtern, die Abmessungen durch die erforderliche Motorgröße bestimmt.

Das Triebwerk mit den Lagerstellen, Pleuel und Kolben kann zwar konventionell ausgeführt werden, muss aber auf die ent-sprechend höhere Drücke und Belastungen bei kleineren Dimensionen, z. B. im Bereich des Kolbenbolzens, angepasst werden.

### Radialkolbenverdichter RK6

Ein ganz anderer Ansatz wurde bei der Konstruktion des Radialkolbenverdichters RK6 verfolgt. Neben der Vorgabe leichter, einfacher und kostengünstig sollte der Verdichter besonders klein und kompakt gestaltet werden.

Wie erläutert, ist bei vorgegebener Käl-teleistung und bei angenommenem gleichen COP die erforderliche Elektromotorgröße

vorgegeben. Aufgrund dessen sollte der ge-samte Verdichter innerhalb der vom Außen-durchmesser des Antriebsmotors vorgege-benen zylindrischen Hüllkurve liegen.

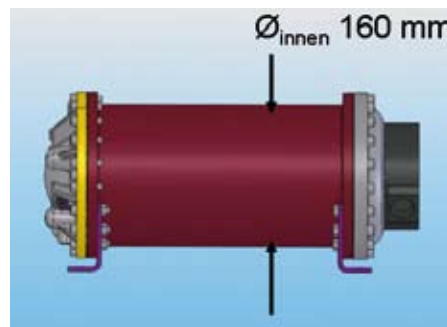
Bei einer klassischen Reihen- oder V-An-ordnung der Zylinder liegen sowohl die Kolben als auch der „Zylinderkopf“ außer-halb dieser Hüllkurve.

Bei einer kreisförmigen Anordnung der Zylinder, wie man sie auch von Sternmo-toren her kennt, liegt der Zylinderbereich innerhalb der vorgegebenen Grenzen. Bei Sternmotoren werden die Kolben mittels Pleuel (Haupt- und Nebenpleuel) bewegt, im Gegensatz zu Radialkolbenverdichtern, die direkt über exzentrische Zapfen der Antriebswelle laufen. Hier werden die Kolben mittels geeigneter Bauteile (Schlit-ten, Laschen und Führungsringe) nach außen gedrückt bzw. zurückgezogen.

Bereits Anfang der 60er Jahre hat Bock einen Radialkolbenverdichter entwickelt, der als vollhermetischer Kältemittelverdich-ter produziert wurde. Dieser Verdichter be-saß einen speziellen und patentierten Me-chanismus zum Bewegen der Kolben. Die in der Vergangenheit gebauten 4-Zylinder-Ver-dichter (z. B. als Pkw-Klimaverdichter) wa-ren als Verdichter für das Kältemittel R12 immerhin bis zu Drehzahlen von 7000 rpm (kurzfristig 8500 rpm) zugelassen.

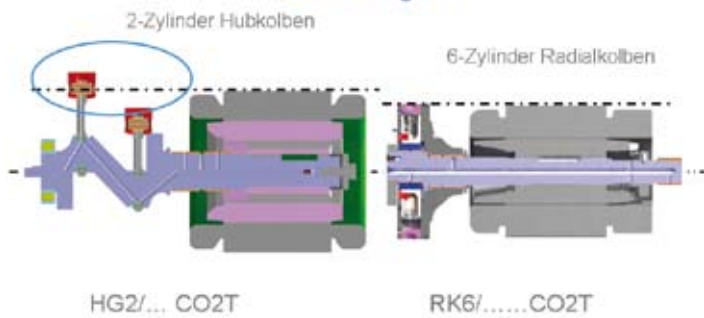
Der neu entwickelte Radialkolbenver-dichter RK6 entstand in Zusammenarbeit mit der Firma Obrist Engineering GmbH, die sich ebenfalls seit Jahren mit der Entwick-lung von CO<sub>2</sub>-Komponenten beschäftigt. Basis für die ersten Versuche war eine Fünf-zylinderausführung. Hier wurden mittels eines fünfeckigen Exzenterringes die Kolben nach außen gedrückt, während ein fünfecki-ger Führungsring die Kolben zurückzieht.

Diese ersten Prototypen dienen nicht nur zu Funktionstests, sondern hier wurde gleichzeitig auch die Effektivität der Saug-gasführung, die Ölversorgung und der Wärmeaushalt des Verdichters getestet. Ebenso dienen diese Maschinen zur ers-ten Ermittlung von Leistungsdaten und wurden in Testanlagen eingesetzt. Diese



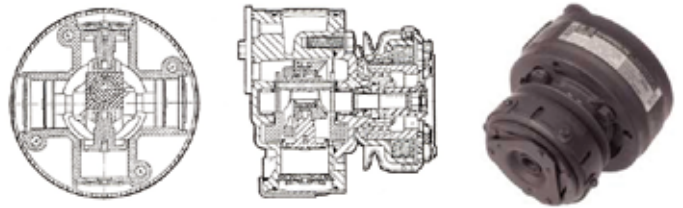
Neuer Radialkolbenverdichter RK6 von Bock:  
1. kleiner, z. B. Durchmesser, E-Motor  
2. leichter  
3. einfacher und kostengünstiger

Größenvergleich



Größenvergleich des 6-Zylinder-Radialkolbenverdichters RK6 mit dem 2-Zylinder-Hubkolbenverdichter HG2 für CO<sub>2</sub>-Anwendungen

Delco R4 - 1976-81



4-Zylinder-Gleichstromverdichter (164ccm)  
 $n_{max} = 7000/8500 \text{ rpm}$

4-Zylinder-Gleichstromverdichter von Delco für die Pkw-Klimatisierung mit dem Kältemittel R12

gesammelten Erkenntnisse führten dann zur Entwicklung des endgültigen Verdichters als 6-Zylinder-Version.

Zusammengefasst kann dieser Verdichter wie folgt beschrieben werden:

- Einfache Gesamtkonstruktion, ausgerichtet auf die speziellen Anforderungen im transkritischen Bereich.
- Nur zwei Flächendichtungen am gesamten Verdichter (Gehäusedeckel, Elektroklemmbrett); siehe Verdichterschnitt im Bild unten rechts.
- Topfförmiges, geschlossenes Gehäuse aus Sphäroguss für maximale Druckfestigkeit.
- Kompletter Triebsatz im Gehäuse integriert, keine Zylinderdeckel erforderlich.

- Nur wenige und kleine hochdruckführende Räume.
- Arbeitsweise der Ventile nach dem Gleichstromprinzip, Sauggas wird in einer Richtung durch die Kolben geschoben und verdichtet. Keine Gaswechselbewegungen, minimalste Gaspulsationen.
- Zentrifugal-Schmierung mit integrierter Ölabscheidung.
- Beste Betriebscharakteristik – 6-Zylinder-Anordnung kreisrund, auf einer Ebene.
- Reichlich dimensionierte Antriebsmotoren, teilsauggasgekühlt in 2- und 4-poliger Ausführung (1500 und 3000 1/min).

Durch seine bestechend kleine Baugröße, der universellen Einbaumöglichkeiten (liegend oder stehend) sowie der Sechs-Zylinder-Ausführung kreisrund angeordnet auf einer Ebene, ergeben sich völlig neue Dimensionen im Anwendungsspektrum sowie im Ausbaupotenzial des Verdichters selbst (z.B. zweistufig).

**Sauggasführung**

Um hohe Verdichterendtemperaturen zu vermeiden, bzw. um die Einsatzgrenzen nicht zu stark einzuschränken, wurde eine ausgeklügelte Sauggasführung realisiert.

Dabei wird der Sauggasstrom mittels abgestimmter Düsen so aufgeteilt, dass ein Teil des CO<sub>2</sub>-Sauggases direkt angesaugt

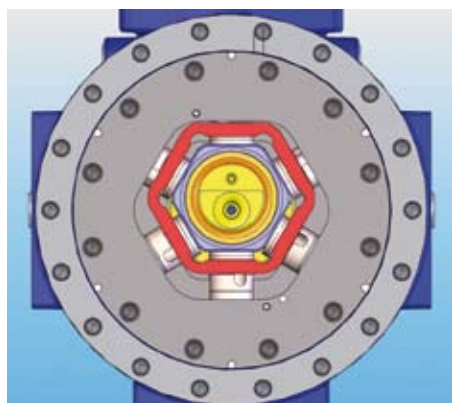
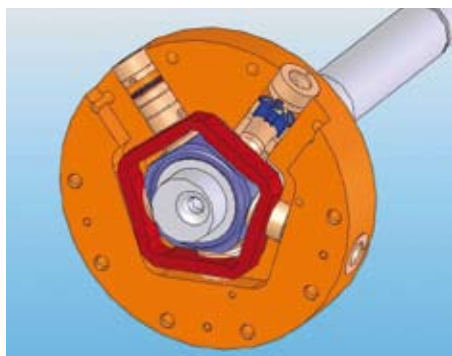
wird. Der andere Teil wird über den Elektromotor geführt. Diese Kombination aus Sauggaskühlung und direktem Ansaugen wird so eingestellt, dass unter allen Einsatzbedingungen der Motor ausreichend gekühlt wird und gleichzeitig innerhalb der erweiterten Anwendungsgrenzen eine zu hohe Verdichtungsendtemperatur vermieden wird.

**Ölkreislauf**

Ein ganz besonderes Augenmerk wurde auf das Ölsystem geworfen, das im Gegensatz zur Tradition im Hause Bock ohne Ölpumpe auskommt.

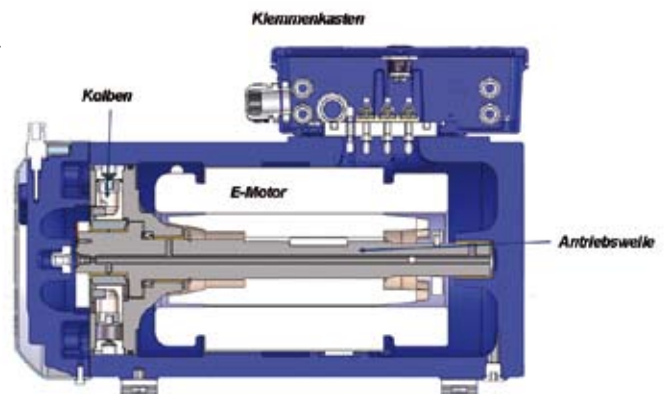
In zahlreichen Tests wurde eine Abstimmung zur Ölversorgung gefunden, welche eine zuverlässige Schmierölversorgung unter allen Bedingungen gewährleistet. Der Ölwurf wird dabei auf einen Verdichter mit Ölversorgung extrem niedrigem Niveau gehalten.

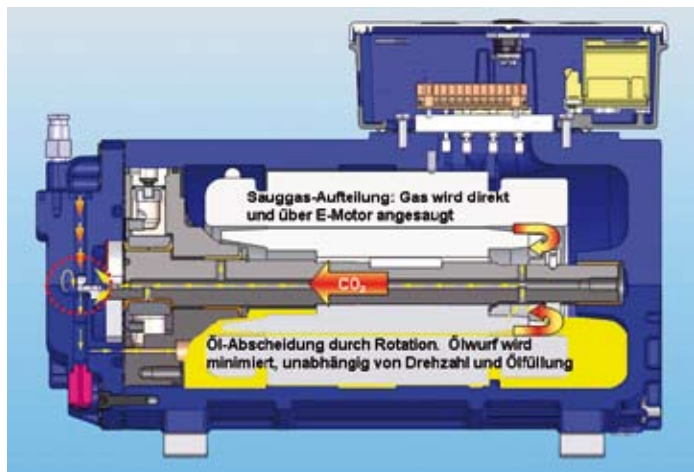
Hierfür wurde eine interne doppelte Ölabscheidung integriert. Das mit dem Sauggasstrom geförderte Öl wird im Verdichter zweifach abgeschieden. In einem vorgeschalteten Zentrifugalabscheider wird eine erste Öltrennung vorgenommen. Das restliche Öl wird mit dem Sauggas durch die Maschine geführt und durch Rotation der Antriebswelle zu den Schmierölstellen gefördert. Gleichzeitig wird Öl durch Zentrifugalkraft abgeschieden.



Vorstufen bei der Entwicklung des Radialkolbenverdichters RK6 bei Bock, hier noch als Fünfzylinderausführung mit fünfeckigem Exzenter- und Führungsring

Schnitt durch den 6-Zylinder-Radialkolbenverdichter RK6 von Bock, der auch durch seine kleine Baugröße besticht





Darstellung der Sauggasführung im CO<sub>2</sub>-Radialkolbenverdichter RK6 von Bock

Das so abgeschiedene Öl sammelt sich im Ölumpf, der sich jeweils bei waagerechter oder senkrechter Aufstellung des Verdichters unten ausbildet.

Die Ölwurfrate bleibt unabhängig von Ölmenge, Drehzahl und Druckverhältnis unter 0,4 % bezogen auf den geförderten Massenstrom.

Die Verdichter sind auf ein spezielles für CO<sub>2</sub> entwickeltes Kältemaschinenöl abgestimmt. Bock C55E (Hersteller Firma Fuchs) ist ein thermisch hochbelastbares synthetisches Esteröl, das eine gute Mischbarkeit/Löslichkeit mit CO<sub>2</sub> aufweist. Es besitzt ein spezielles Additiv, welches die Verdichter auch unter extremen Belastungen, welche in CO<sub>2</sub>-Anlagen herrschen, sicher vor Verschleiß schützt. Dieses Öl hat sich in zahlreichen Tests sowohl als geeignetes Schmiermittel in transkritischen als auch in unterkritischen Anlagen bewährt.

### Leistungsbewertung

Die wichtigsten Bewertungskriterien sind der isentrope Wirkungsgrad und der Liefergrad (volumetrische Wirkungsgrad). Im Liefergrad sind neben den Leckage- und

Rückexpansionsverlusten besonders die Effektivität der Saug- und Druckventile beschrieben.

Der CO<sub>2</sub>-Prozess arbeitet generell bei ca. drei- bis vierfach niedrigeren Druckverhältnissen, was die Wirkungsgrade erhöht. Messergebnisse mit den allerersten Verdichtern zeigen, im Vergleich zu herkömmlichen Verdichtern mit 1500 rpm, den Einfluss hoher Drehzahlen sowohl im Liefer- als auch im Wirkungsgrad. Optimierungspotenzial ergibt sich hinsichtlich des Schadvolumens und der Strömungsverluste. Verglichen mit einem herkömmlichen 2-Zylinder-Verdichter scheinen speziell bei hohen Drehzahlen noch Möglichkeiten zur Verbesserung.

### Einsatzbereiche

Kohlendioxid, CO<sub>2</sub>, ist ein umweltfreundliches Kältemittel. Es ist aber wegen seiner spezifischen Eigenschaften kein Kältemittel für den universellen Einsatz. Es eignet sich im Allgemeinen hervorragend für Kaskadensysteme und hier besonders in der Niederdruckstufe. CO<sub>2</sub> ist ebenfalls als Sole für indirekte Systeme geeignet.

Der Radialkolbenverdichter mit CO<sub>2</sub> ist für folgende Einsatzbereiche vorgesehen: Supermarktanwendungen (Hoch- und Niederdruckstufen), Wärmepumpen, mobile Klimaanlage (besonders für den Bahneinsatz), Containerkühlung und für kleinere Gewerbeanwendungen.

### Ausblick

Der Einsatz von CO<sub>2</sub> als Kältemittel wurde ursprünglich durch Umweltaspekte initiiert. Schnell haben sich für verschiedene Einsatzbereiche technische Vorteile gezeigt. Heute kann man davon ausgehen, dass sich CO<sub>2</sub> als Kältemittel in der Niederdruckstufe von Kaskadenanlagen bewährt hat.

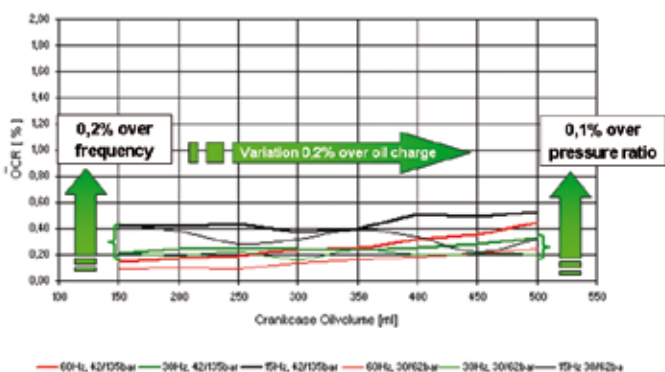
Die besonderen Eigenschaften von CO<sub>2</sub> und die hohen Systemdrücke machen die Entwicklung neuer Verdichter besonders im Bereich transkritischer Anwendung notwendig. Wenn es auf kleine Abmessungen ankommt, ist der hier vorgestellte Radialkolbenverdichter aufgrund seiner kompakten Bauform für Anwendungsfälle im transkritischen CO<sub>2</sub>-Kreislauf besonders geeignet.

Die Testergebnisse des Prototyps in 5-Zylinder-Ausführung zeigten nach einjähriger Laufzeit die erwarteten guten Leistungswerte. Verbesserungsmöglichkeiten des volumetrischen Wirkungsgrads hinsichtlich hoher Drehzahlen sind noch offen.

Geplant ist nach den ersten Erfahrungen als Nächstes eine größere Testserie, welche in verschiedenen Anwendungen erprobt werden soll. Ein Ausbau der Baureihe, auch hinsichtlich zweistufiger Verdichter und oder Tandemanwendung, wird parallel durchgeführt. ■

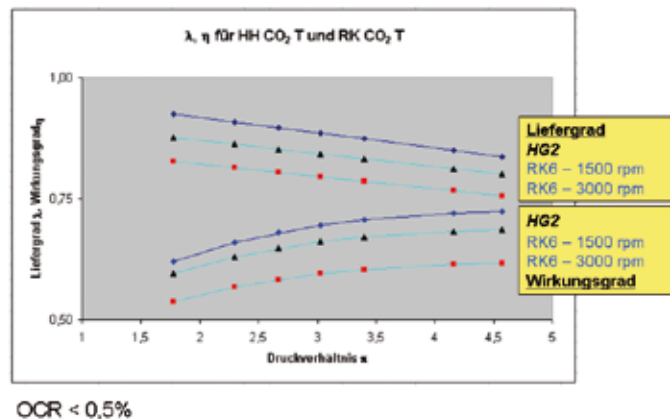
Als Vortrag gehalten auf der Deutschen Kälte-Klima-Tagung des DKV am 23. 11. 2006 in Dresden

### Ölwurf Verdichter



Die Ölwurfrate bleibt unter 0,4 %, bezogen auf den geförderten Massenstrom

### Leistungsdaten HG2/RK6



Gegenüberstellung der Leistungsdaten der Bock Verdichter HG2 und RK6